

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI ÉS INFORMATIKAI KAR
FIZIKA DOKTORI ISKOLA

Termonukleáris csillagrobbanások szupernóva-tomográfiája

Doktori (Ph.D.) értekezés tézisei

Barna Barnabás
okleveles csillagász

Témavezető:
Dr. Vinkó József
tudományos főmunkatárs

Szeged, 2019

Tudományos háttér

Az Ia szupernóvák a csillagászat és a kozmológia kiemelt jelentőségű objektumai. Ezek a szupernóvák főleg szénből és oxigénből álló fehér törpecsillagokból (WD) keletkeznek, amelyekben energiatermés már nem zajlik, a gravitációs összehúzódásnak pedig az elfajult (degenerált) elektrongáz nyomása tart ellent. Amennyiben a WD egy kettős- vagy többes rendszer tagja, bizonyos konfigurációk esetén tömeget szívhat el a társcsillagától. A klasszikus, ún. szimplán degenerált forgatókönyv szerint a tömegszerzés a Chandrasekhar-tömeghatárig tart (forgás nélküli C/O WD esetében $M_{Ch} = 1,44M_{\odot}$), amelynél a WD magjában a megnövekedett sűrűség és hőmérséklet hatására beindul a szén-fúziója. Mivel az elfajult anyag nyomása nem függ a hőmérséklettől, a fúzió megszabadul, a felszabaduló energia pedig szétveti a WD-t. A megfigyelések és az elmélet közti ellentmondásokat az utóbbi évtizedben több alternatív, ún. duplán degenerált (DD) robbanási modell is igyekezett magyarázni, amelyekben két fehér törpe összeolvadása során indul be a robbanásszerű fúzió.

Az Ia szupernóvák jelentősége elsősorban abban rejlik, hogy a maximális fényességük erős korrelációt mutat az elhalványodásuk ütemével. Mivel utóbbi jellemzőjük könnyen mérhető, ezek az objektumok távolságindikátorokként alkalmazhatóak, nagy luminozitásuk miatt akár kozmológiai skálákon is. A módszerrel nem csak galaxisok távolsága határozható meg, de közvetetten a Hubble-Lemaître paraméter és annak múltbéli változásai is megállapíthatóak. 1999-ben egymástól függetlenül két kutatócsoport is Ia szupernóvák vizsgálata alapján jutott arra a következtetésre, hogy az Univerzum gyorsulva tágul - munkájukat 2011-ben fizikai Nobel-díjjal ismerték el (Riess és mtsai, 1998; Perlmutter és mtsai, 1999). Emellett a szupernóva extrém tulajdonságai kiváló lehetőséget nyújtanak, hogy asztrofizikai laboratóriumként vizsgálhassuk az ott lezajló folyamatokat.

A több évtizedes intenzív kutatás ellenére azonban a termonukleáris szupernóvák pontos mechanizmusai nem ismertek. A legfontosabb tisztázandó kérdések a robbanáshoz vezető tömegszerzés mikéntje (szimplán vagy duplán degenerált kettőscsillag), a fúziós front terjedése, valamint a környezetükkel való esetleges kölcsönhatás. Mindegyik témában a robbanás során keletkezett kémiai elemek tömegarányának és

azok eloszlásának vizsgálata jelenthet megoldást, spektroszkópiai modellezés révén.

A szupernóvák spektroszkópiai analízise azonban komoly kihívást jelent, a nagy sebességgel táguló ledobott anyagfelhő ugyanis akár több száz ångström-re kiszélesedett színekp vonalakat eredményez. A spektrumvonalak átfedései megnehezítik az azokat keltő ionok azonosítását, valamint a vonalprofilok elkülönítését. Kevés kivételtől eltekintve az egyes spektrumvonalak önmagukban nem, csak a spektrum egészével együtt modellezhetők, ami nagy számú illesztési paramétert és magas degenerációt eredményez egy modell illesztése során. Az illesztési feltételek száma azonban növelhető a szupernóva-tomográfia módszerével.

Ahogy a szupernóva-burok folytonosan tágul, az atmoszféra sűrűsége és hőmérséklete is csökken. Ennek következtében a fotoszféra, amely elválasztja az optikailag átlátszatlan belső- és átlátszó külső tartományokat, fokozatosan visszahúzódik, mélyebb rétegekbe engedve ezzel bepillantást. Az újonnan belépő rétegek immáron hozzájárulnak a színekp vonalak kialakításához, míg a legkülső, alacsony sűrűségű régiók jelentősége folyamatosan csökken. Mindezek eredményeként a vizsgált szupernóváról felvett színekpek az idő előrehaladtával végig mintavételezik a ledobott anyagfelhőt kívülről befelé. Amennyiben a spektrumanalízis során nem csak egy epochát, hanem egy teljes színekpsorozat illesztünk meg ugyanazzal az önkonzisztens modell-struktúrával, úgy a burok fizikai- és kémiai eloszlásai feltérképezhetők (Stehle és mtsai, 2005). A szupernóva-tomográfiának nevezett módszer további előnye, hogy a szabad paraméterek számát kisebb mértékben növeli, mint ahogy az illesztési feltételekét, csökkentve ezzel a szupernóva modellezés degenerációját.

A normál Ia szupernóvák modellezési nehézségeivel szemben a tomográfiás vizsgálat ideális tárgyai az ún. Iax szupernóvák, amelyek a termonukleáris szupernóvák egyik alosztályát alkotják. Különlegességük, hogy luminozitásuk és tágulási sebességük is alacsonyabb, valamint mindkét jellemzőjük széles tartományt ölel fel, az extrém alacsony értékektől kezdve (SN 2008ha: $M_V = -14,5$ mag; $v_{\text{tot}} = 2.500$ kms⁻¹; Foley és mtsai, 2010a) a normál Ia szupernóvák értékeit közelítő tulajdonságokig (SN 2011ay: $M_V = -18,4$ mag; $v_{\text{tot}} = 9.500$ kms⁻¹; Szalai és mtsai, 2015). Az Iax szupernóvák bizonyítottan WD robbanásokból származnak, a robbanás mechanizmusa azonban nyilvánvalóan eltér az Ia típusúakétól. A szakirodalom alapján valószínűsíthető, hogy ezek az objektumok tisztán deflagrációs robbanásból

származnak, azaz a fúziós front a közegbeli hangsebességnél lassabban terjed a WD-ben. A hidrodinamikai szimulációk megerősítették, hogy a deflagráció erősségének skálázásával reprodukálhatóak az Ia szupernóvák változatos fényességei és kinetikus energiái, valamint nagy vonalakban reprodukálhatóak a spektrális jellemzők is. A deflagrációs szimulációk gyakorlatilag minden esetben közel konstans abundanciaprofilokat jósoltak, amelyekben a radioaktív ^{56}Ni , az oxigén valamint a szén rendelkezik a legnagyobb tömegarányokkal (Fink és mtsai, 2014).

Kutatási módszerek

Doktori kutatómunkám során először a normál Ia szupernóvák színképsorozatait modelleztem, amelynek fő motivációja a nagysebességű vonalkomponensek (HVF) felmérése és sebességváltozásaik nyomonkövetése volt. Az illesztésekhez az egyszerűsített szupernóva-modellt alkalmazó SYN++ kóddal (Fisher és mtsai, 1997; Thomas és mtsai, 2011) készítettem szintetikus színképeket. A kód egy tisztán feketetest-sugárzásból származó kontinuum-fluxusra illeszt rezonáns szórásból származó P Cygni vonalprofilokat. Belátható, hogy a SYN++ modellek nem alkalmasak teljes szupernóva-tomográfiára, mivel a kód csak a megfigyelt vonalprofilok definiálásra ad lehetőséget. Ezzel pusztán a spektrumvonalak azonosítását, illetve a vonalformáló régiók sebességeinek becslését lehetséges elvégezni, a szupernóva-burok felépítését (sűrűségfüggvény és kémiai abundanciák) azonban közvetlenül nem lehet vizsgálni. A limitáció ellenére a SYN++ a szakirodalom által széleskörben alkalmazott és elfogadott módszere a szupernóvák spektroszkópiai analizésére.

A Silverman és mtsai (2015) publikációjában hat Ia szupernóva maximum előtti színképét illesztettem meg, különös tekintettel a HVF-t mutató Ca II és Si II vonalakra. A vizsgálat célja a szerzők által kidolgozott, automatizált Gauss-illesztő algoritmus által azonosított HVF komponensek és sebességértékek ellenőrzése volt. Ezt követően egy különösen nagy sebességet és erős HVF komponenseket mutató Ia szupernóva, az SN 2010kg színképsorozatának részletekbe menő analizését végeztem el a SYN++-szal (Barna és mtsai, 2016). Összesen tíz ion színképvonalait azonosítottam, amelyek közül a szakirodalom alapján várt HVF-k és fotoszférikus

komponensek mellett az O II és a Fe II köztes sebességekkel volt jelen az atmoszférában. Az egyes ionok folytonos vagy ellaposodó sebességfüggvényei alapján következtetni tudtam a kémia elemek rétegződésére a szupernóva-atmoszféra vizsgált tartományán.

A későbbiekben teljes értékű tomográfiás analíziseket végeztem a Monta Carlo alapú TARDIS egydimenziós radiatív transzfer kóddal (Kerzendorf és Sim, 2014). A TARDIS lehetővé teszi a modell-struktúra (sűrűség- és kémiai abundanciaprofil) közvetlen definiálását, ezáltal ténylegesen felmérhető a szupernóva burok összetétele. A modell számítási terét, ami gyakorlatilag a szupernóva-atmoszférának feleltethető meg, radiális cellákra osztja, amelyek jellemzői a megadott modell-struktúrából származnak. A számítási tér alsó határa a fotoszféra, amely alatti tartományt egy átlátszatlan feketetesszel közelíthető. A programcsomag a megadott paraméterek (luminositás, fotoszféra sebessége, robbanás óta eltelt idő) alapján egy Planck-függvény mintavételez és állít össze a luminositás alapján megadott számú fotoncsomagot, amelyek útját követi a modell-atmoszférán keresztül. A fotoncsomagok aktuális radiális cellában egy Monte Carlo szimuláció eredményétől függően továbbhaladnak, Thomson-szóródást szenvednek vagy ionokkal hatnak kölcsön (Lucy, 2002). A kölcsönhatások során a csomagok energiája nem, hullámhosszuk azonban módosulhat. A számítási tér tetején kijutó fotoncsomagok energiája és a megadott luminositás alapján a TARDIS módosítja a fotoszféra és az egyes rétegek hőmérsékletét, hogy a modell-atmoszféra fizikailag önkonzisztens legyen, majd újabb iteráció kezdődik. Az utolsó iteráció végén a számítási térből kijutó fotoncsomagok alkotják a szintetikus színképet.

A vizsgálat tárgyainak a pekuliáris Iax szupernóvákat választottam, amelyeken korábban még nem végeztek hasonlóan részletes tomográfiás vizsgálatot. A kutatás első publikációjában (Barna és mtsai, 2017) a relatíve fényes SN 2011ay színképsorozatát (Szalai és mtsai, 2015) illesztettem meg a TARDIS modellekkel. Az eredményül kapott modellek szintetikus színképei remek egyezést mutattak a mért adatsorokkal, az illesztési stratégia pedig alkalmasnak bizonyult a fizikai- és kémiai viszonyainak feltérképezésére. A legjobb modellben a kémiai elemek tömegarányai azonban nem konstans jellegűek voltak, ahogy azt a deflagrációs szimulációk alapján várható lett volna (Fink és mtsai, 2014). Az Iax szupernóva rétegzett struktúrájának

kimutatása további vizsgálatokat tett indokolttá.

A kutatásom következő szakaszában (Barna és mtsai, 2018) a tomográfiás vizsgálat követelményei alapján összeállítottam egy kisebb, öt Iax típusú szupernóva színképeiből álló mintát. Az így kapott összesen harminc színképpel végeztem el az öt abundancia tomográfiát a TARDIS-szal. A korábbi tapasztalatok alapján változtattam az illesztési stratégián, úgy hogy közvetlenül a megfelelő deflagrációs szimulációk abundancia- és sűrűségprofiljait tudjam tesztelni. Az eredmények megerősítették az SN 2011ay korábbi analízise alapján nyert konklúziókat, valamint általános összefüggéseket tudtam levonni az Iax szupernóvák luminózusabb felét reprezentáló mintával kapcsolatban. Összességében elmondható, hogy bár a legjobb illeszkedést mutató modellek számos hasonlóságot mutatnak a deflagrációs szimulációk jóslataival (pl. sűrűségprofilok alakja, vonalformáló ionok jelenléte, belső tartományok kémiai abundanciái), a különbségek (külső tartományok rétegződése, szén hiánya) indokolják az Iax szupernóvák lehetséges robbanási mechanizmusainak felülvizsgálatát.

Új tudományos eredmények

1. Az egyszerűsített szupernóva-modellre épülő SYN++ program használatával normál Ia szupernóvák színképeit illesztettem, valamint ez alapján állapítottam meg vonalformáló régiók és a fotoszféra térbeli elhelyezkedését.

1.a. Modelljeimet összevetettük az egyedi színkép vonalak Gauss-profilokkal való illesztésével. Az összehasonlításból kiderült, hogy a két módszer hibahatáron belül ugyanazt az értéket adja a HVF-k sebességértékére, megerősítve ezzel a kisebb számítási kapacitású Gauss-illesztés alkalmazhatóságát.

1.b. SYN++ modellekkel illesztettem a különösen nagy sebességű vonalkomponenseket mutató SN 2010kg színképeit a robbanást követő egy hónapból. A teljes színképsorozat illesztésével lehetővé vált a jelenlévő ionok precízebb azonosítása, ezáltal olyan színkép vonalakat is sikerült azonosítani, amiket a szakirodalomban nem vagy pedig más ionokkal azonosítottak.

1.c. SYN++ modellek illesztésével vizsgáltam az egyes ionok vonalformáló ré-

gióinak időbeli változását. Az analízis feltárta, hogy egyes kémiai elemek egyrészt a fotoszférához közel, másrészt a felett, ám szupernóva atmoszféra külső tartományában keletkező HVF-knél alacsonyabb sebességeknél is kellenek vonalkomponenseket. Ezek az elemek folytonosan vannak jelen a burok egészében. Ezzel párhuzamosan a Ca II, valamint az Si II ionok fotoszférikus és HVF vonalformáló régióinak sebességfüggvényei nem fednek át, ami az adott kémiai elemek rétegződésére utal.

2. A TARDIS elnevezésű MC radiatív transzfer-kóddal pekuliáris Iax típusú szupernóvák színképsorozatait illeszttem. A módszerrel feltérképeztem a vizsgált objektumok fizikai paramétereinek profilját, valamint a kémiai abundanciák eloszlását.

2.a. Az egyik legfényesebb Iax, az SN 2011ay analízisével megmutattam, hogy a TARDIS kód képes reprodukálni a szupernóva színképeinek minden főbb jellegzetességét, valamint alkalmas a tomográfiás módszer kivitelezésére a szupernóva robbanásától számított egy hónapon belül.

2.b. A szupernóva-tomográfiás módszer alkalmazására a szakirodalomban mindössze néhány példa található; Iax szupernóvát pedig ezt megelőzően mindössze Sahu és mtsai (2008) vizsgált ilyen módon. Munkamódszereikhez képest modelljeimben több kémiai elem jelenlétét és a színképekhez való hozzájárulásukat is vizsgáltam, ezáltal az Iax szupernóvák eddigi legrészletesebb spektrálanalízisét végeztem el.

3. A modellezésekből származó eredményeket összevettem az Iax-k főbb megfigyelési jellemzőit jól reprodukáló, ún. tisztán deflagrációs modellek hidrodinamikai modelljeivel.

3.a. A deflagrációs szimulációk egyik fontos jellemzője, hogy az atmoszféra jelentős részében (az általam vizsgált tartomány egészén) a kémiai elemek tömegaránya gyakorlatilag konstans. A deflagrációs modellek által mutatott kémiai arányok felhasználásával számított szintetikus színképek ezzel szemben szisztematikus eltérést mutattak egyrészt a korai epocháknál megjelenő erős vasvonalak, másrészt a maximum környéki epochák kéeltolódott vonalprofiljai tekintetében. Mindkét tényező arra utal, hogy a tisztán deflagrációs robbanás nem megfelelően írja le az Iax szupernóvák legkülső tartományának tulajdonságait.

3.b. A deflagrációs szimulációkból származó sűrűség-profilok variálásával megmutattam, hogy az eltérések csak részben tudhatóak be a legkülső rétegekben található gáz mennyiségének. Ahhoz, hogy a vonalprofilok minden epocha esetén megfelelően illeszthetők legyenek, a kémiai elemek abundanciáját is változtatni kell, vagyis a konstans tömegarányok nem helytállóak a burok nagy sebességű tartományában.

3.c. A belső régiókban a deflagrációs modellek kémiai abundanciái, különösen az erős abszorpciókat mutató elemek esetében jó egyezést mutatnak az általam feltérképezett értékekkel. A legjobb illeszkedést mutató sűrűség-profilok szintén összeegyeztethetők a hidrodinamikai szimulációkból származó jóslatokkal. Mindez azt mutatja, hogy a legkülső tartomány kivételével a tiszta deflagráció képes előállítani az Iax szupernóvák struktúráját.

3.d. Az előző pontban említett, a szupernóva-atmoszféra belső régióiban tapasztalt hasonlóságok mellett az egyedüli kivételt a szén jelenti, amely a deflagrációs szimuláció szerint 10-20%-t alkotja az Iax szupernóvák burkának. A tomográfiás eredményeim ezzel szemben azt mutatják, hogy szén egyáltalán nem, vagy csak igen kis ($<1\%$) arányban lehet jelen az atmoszféra belső régióiban. A külső régiók esetében (a korai epochák hiánya miatt) felső határt tudtam becsülni a gyakoriságára.

4. A szupernóva-tomográfiás módszert kiterjesztettem egy kisebb Iax mintára, amelyben az objektumok jól lefedik a változatos fényességű alcsoport fényesebb felét. A kémiai abundanciák-, valamint a fizikai paraméterek feltérképezése az Iax szupernóvák hasonló tulajdonságaira és ezáltal valószínűsíthető közös eredetükre világított rá.

4.a. Az Iax szupernóvák sűrűség-profilja jól leírható egyazon exponenciális jellegű függvényvel, amelyben a két változó a centrális sűrűség értéke és az a sebességérték, amely felett a profil divergálni kezd a tisztán exponenciális függvénytől.

4.b. Habár a különböző fényességű Iax szupernóvák jelentősen eltérő tágulási sebességet mutatnak, a kémiai abundancia-profiljuk hasonló tulajdonságokkal bír. Egy, az elemgyakoriságtól függő sebességértéket referenciaként választottam és az attól mért relatív sebesség-rétegekben átlagoltam az mintában szereplő Iax szupernóvák kémia tömegarányait. Az ilyen módon létrehozott kémiai abundancia-minta egy szabad paraméter változtatásával képes leírni a vizsgált Iax szupernóvák belső

struktúráját.

4.c. Ahogy arra a szakirodalom több cikke is rámutat, az Iax-k luminozitása és tágulási sebessége között gyenge korreláció figyelhető meg. A vizsgált öt szupernóva esetében ez a korreláció kifejezetten erős és kiterjed a sűrűség-, valamint a kémiai abundancia-profilra is.

Hivatkozások

- Barna B. et al., 2016, MNRAS, 457, 3225
- Barna B. et al., 2017, MNRAS, 471, 4865
- Barna B. et al., 2018, MNRAS, 480, 3609
- Fink, M. et al., 2014, MNRAS, 438, 1762
- Fisher, A., et al., 1997, ApJ, 481, 89
- Foley, R. J., et al. 2010a, ApJ, 708, 61
- Kerzendorf, W. & Sim, S. 2014, MNRAS, 440, 387
- Lucy, L. B. 2002 A&A, 384, 725
- Perlmutter, S., et al. 1999, ApJ, 517, 565
- Riess, A. G., et al. 1998, AJ, 116, 1009
- Sahu, D. K., et al. 2008, ApJ, 680, 590
- Silverman, J. M., et al. 2015, MNRAS, 451, 1973
- Stehle, M., et al. 2005, MNRAS, 360, 1231
- Szalai T., et al. 2015, MNRAS, 453, 2103
- Thomas, R. C., Nugent, P. E., Meza, J. C. 2011, PASP, 123, 237

Publikációk (MTMT azonosító: 10055067)

I. Az értekezésben felhasznált publikációk

Referált angol nyelvű cikkek:

- Silverman, J. M.; Vinkó, J.; Marion, G. H.; Wheeler, J. C.; **Barna, B.**; Szalai, T.; Mulligan, B. W.; Filippenko, A. V.: *High-velocity features of calcium and silicon in the spectra of Type Ia supernovae*, 2015, MNRAS, 451, 1973
- **Barna, B.**; Vinkó, J.; Silverman, J. M.; Marion, G. H.; Wheeler, J. C.: *Possible detection of singly ionized oxygen in the Type Ia SN 2010kg*, 2016, MNRAS, 457, 3225
- **Barna B.**, Szalai, T.; Kromer, M.; Kerzendorf, W. E.; Vinkó, J.; Silverman, J. M.; Marion, G. H.; Wheeler, J. C.: *Abundance tomography of Type Iax SN 2011ay with Tardis*, 2017, MNRAS, 471, 4865
- **Barna B.**, Szalai, T.; Kerzendorf, W. E.; Kromer, M.; Sim, S. A.; Magee, M. R.; Leibundgut, B.: *Type Iax supernovae as a few-parameter family*, 2018, MNRAS, 480, 3609

II. Az értekezés témájához kötődő konferenciaanyagok

Angol nyelvű konferenciaposzterek:

- Szalai, T.; Vinkó, J.; **Barna, B.**, Silverman, J. M., Marion, G. H.; Wheeler, J. C.: *Measuring expansion velocities in Type Iax SNe*, Type Ia supernovae progenitors, explosions and cosmology (Chicago, USA, 2014.09.15-19.)
- **Barna, B.**; Vinkó, J.; Silverman, J. M.; Marion, G. H.; Wheeler, J. C.: *Detection of C III in the Type Ia SN 2010kg*, F.O.E. Fifty-One Erg workshop (Raleigh, USA, 2015.06.01-05.)

- **Barna, B.**; Szalai, T.; Vinkó, J.; Silverman, J. M.; Marion, G. H.; Wheeler, J. C.; Kerzendorf, W. E.: *Comparative spectroscopic analysis of Type Iax SNe*, Supernovae Through the Ages (Húsvét-sziget, Chile, 2016.08.08-13.)
- Camacho-Neves, Y.; Jha, S. W.; **Barna, B.**; Foley, R.; McCully, C.: *Spectral divergence of the Type Iax Supernova SN 2014dt*, 233rd AAS Meeting (Seattle, USA, 2019.01.06-10.)

Angol nyelvű konferenciaelőadás:

- **Barna B.**; Szalai, T.; Kerzendorf, W. E.: *Abundance tomography of Type Iax SNe*, Supernovae - From Simulations to Observations and Nucleosynthetic Fingerprints (Bad Honnef, Németország, 2018.01.21-24.)

Társszerzői nyilatkozat

Alulírott nyilatkozom arról, hogy Barna Barnabás „*Termonukleáris csillagrobbanások szupernóva-tomográfiája*” című doktori értekezésének 1., 2. és 3.a. tézispontjaiban szereplő, az alábbi cikkekben közösen publikált eredmények elérésében a jelölt szerepe meghatározó volt. Ezeket az eredményeket korábban nem használtam tudományos fokozat megszerzésére, és ezt a jövőben sem teszem.

- Silverman, J. M.; Vinkó J.; Marion, G. H.; Wheeler, J. C.; Barna B.; Szalai T.; Mulligan, B. W.; Filippenko, A. V.: *High-velocity features of calcium and silicon in the spectra of Type Ia supernovae*, 2015, MNRAS, 451, 1973 **(T1)**
- Barna B.; Vinkó J.; Silverman, J. M.; Marion, G. H.; Wheeler, J. C.: *Possible detection of singly ionized oxygen in the Type Ia SN 2010kg*, 2016, MNRAS, 457, 3225 **(T1)**
- Barna B.; Szalai T.; Kromer, M.; Kerzendorf, W. E.; Vinkó J.; Silverman, J. M.; Marion, G. H.; Wheeler, J. C.: *Abundance tomography of Type Iax SN 2011ay with Tardis*, 2017, MNRAS, 471, 4865 **(T2-T3)**

Szeged, 2019.02.04.

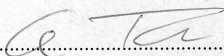
.....
Dr. Vinkó József

Társszerzői nyilatkozat

Alulírott nyilatkozom arról, hogy Barna Barnabás „*Termonukleáris csillagrobbanások szupernóva-tomográfiája*” című doktori értekezésének 1.a., 2., 3. és 4. tézispontjaiban szereplő, az alábbi cikkekben közösen publikált eredmények elérésében a jelölt szerepe meghatározó volt. Ezeket az eredményeket korábban nem használtam tudományos fokozat megszerzésére, és ezt a jövőben sem teszem.

- Silverman, J. M.; Vinkó J.; Marion, G. H.; Wheeler, J. C.; Barna B.; Szalai T.; Mulligan, B. W.; Filippenko, A. V.: *High-velocity features of calcium and silicon in the spectra of Type Ia supernovae*, 2015, MNRAS, 451, 1973 **(T1)**
- Barna B., Szalai T.; Kromer, M.; Kerzendorf, W. E.; Vinkó J.; Silverman, J. M.; Marion, G. H.; Wheeler, J. C.: *Abundance tomography of Type Ia SN 2011ay with Tardis*, 2017, MNRAS, 471, 4865 **(T2-T3)**
- Barna B., Szalai T.; Kerzendorf, W. E.; Kromer, M.; Sim, S. A.; Magee, M. R.; Leibundgut, B.: *Type Ia supernovae as a few-parameter family*, 2018, MNRAS, 480, 3609 **(T3-T4)**

Szeged, 2019.02.04.



Dr. Szalai Tamás